

## ОПЕРАТИВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТОКА НАГРУЗКИ АЛЮМИНИЕВОГО ЗАВОДА С ПОМОЩЬЮ УПРАВЛЯЕМЫХ СТАТИЧЕСКИХ ИРМ

Р. И. ОСТАПЕНКО, Н. Е. ЧЕРНЫЙ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических станций  
и электрических систем и сетей)

В [1] рассмотрен круг вопросов, связанных с регулированием режима электрических систем и дальних электропередач и повышения их устойчивости при помощи управляемых статических источников реактивной мощности (ИРМ). Предварительные проработки свидетельствуют о том, что управляемые статические ИРМ могут быть использованы и для регулирования режима электропотребления нагрузок.

В настоящей статье рассматриваются вопросы, связанные с использованием статических ИРМ для оперативного регулирования тока нагрузки кремниевой преобразовательной подстанции (КПП) алюминиевого завода.

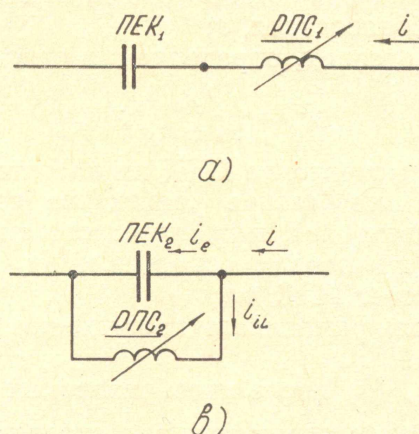


Рис. 1

На рис. 1 приведены принципиальные схемы ИРМ. Рассматриваемые схемы управляются реакторами переменного сопротивления (РПС), включенными последовательно или параллельно с конденсаторной батареей. С учетом этого, при граничных условиях регулирования  $x_{p1}=0$ ,  $x_{p2}=\infty$  возникают схемы обычной продольной компенсации (ПЕК) нагрузки. Это позволяет использовать в исследованиях в той или иной мере анализ и основные соотношения продольно компенсированной КПП, приведенные в [2, 3].



## Регулировочные свойства ИРМ с последовательно включенным РПС

Для схемы рис. 1 а, учитывая то, что оперативный диапазон регулирования сравнительно мал ( $\pm 5\%$  от среднего тока нагрузки), считаем нагрузочный режим КПП в процессе регулирования неизменным. С учетом этого анализ регулировочной характеристики приведем с помощью известных соотношений [2, 3, 4], выразив переменные в виде суммы постоянных и их приращений.

Поскольку из технологических соображений электролиза необходимо поддерживать постоянство тока нагрузки при переменном сопротивлении нагрузки, принимаем постоянными ток нагрузки КПП и э. д. с. системы. При этом условии уравнение, связывающее изменение выпрямленного напряжения и угла коммутации с изменением реактивного сопротивления в цепи коммутации вентилей для I и II нагрузочного режима КПП, имеет вид

$$\frac{(I')^2}{3\sin^2 \frac{\gamma}{2}} + \frac{(\tau - \Delta\tau)^2}{\cos^2 \frac{\gamma}{2}} = 1, \quad (1)$$

где

$$I' = I \left[ 1 - v^2 \gamma \left( 3,73 \cdot \frac{\pi}{6} - \frac{\gamma}{2} \right) \right], \quad (2)$$

$I$  — относительное значение тока нагрузки эквивалентного «моста звезды» или «моста треугольника», равное  $\frac{I_d(x_a + x_p)}{\sqrt{2} E_2}$ ;

$\tau$  — относительное значение выпрямленного значения напряжения КПП;

$\gamma$  — угол коммутации вентилей, эл. град;

$I_d$  — ток нагрузки эквивалентного «моста звезды» или «треугольника» КПП, равный половине тока нагрузки КПП, а;

$E_2$  — действующее значение э. д. с. питающей системы, приведенное к шинам преобразователя, в;

$v^2$  — степень компенсации, определяемая отношением

$$[v^2 = \frac{x_c}{x_a + x_p};$$

$x_c$  — емкостное сопротивление ПЕК на частоте 50 гц, в см;

$x_a$  — естественное или базовое реактивное сопротивление в цепи коммутации вентилей, эквивалентного «моста звезды», ом;

$x_p$  — изменение индуктивного сопротивления в цепи коммутации вентилей за счет РПС, ом;

$\Delta\tau$  — приращение выпрямленного напряжения в относительных единицах.

Из уравнения (1), (2) после преобразований получим выражение, связывающее в явном виде параметры регулирования КПП  $x = \frac{x_p}{x_a}$ ,

$(\tau - \Delta\tau)$  и  $\gamma$ , при  $I_d$  и  $E_2 = \text{const.}$

$$\bar{x} = -(1 - v_0^2) + \sqrt{(1 - v_0^2)^2 + \frac{3\text{tg}^2 \frac{\gamma}{2}}{I_0^2} (2\tau_0 - \Delta\tau^2)}, \quad (3)$$

где

$\tau_0$  — относительное значение выпрямленного напряжения при  $x_p = 0$ ;

$I_0$  — относительное значение тока нагрузки некомпенсированной КПП при  $x_p = 0$ ;



$\gamma_0^2$  — степень компенсации КПП при  $x_p = 0$ .

Из (3) следует, что регулирование возможно только вниз от значения  $\tau_0$ . Однако за счет подбора соответствующей степени компенсаций всегда можно сделать так, чтобы в процессе регулирования преобладал компенсирующий эффект ИРМ.

Уравнение (3) легко может быть преобразовано для второго нагрузочного режима, заменой  $\gamma$  в соответствии с равенством  $\frac{\gamma}{2} = 15$ .

### Расчет мощности элементов ИРМ

С помощью соотношения (3) при заданной величине  $\gamma_0^2$  нетрудно найти требуемую мощность РПС и ПЕК:

$$Q_{\text{РПС}} = 3 \bar{x} x_a I_1^2 \approx 3 \bar{x} \cdot x_a \cdot \frac{2,5 I_d^2}{c^2}, \quad (4)$$

$$Q_{\text{ПЕК}} \approx 3 \gamma_0^2 x_a \frac{2,5 I_d^2}{c^2}, \quad (5)$$

где

$I_1$  — действующее значение линейного первичного тока, приближенно равное [2]  $I_1 \approx 0,79 \frac{2I_d}{c}$ ;

$c$  — коэффициент трансформации.

Пример. Определим требуемую мощность реактора и батареи ПК при условии, что  $E_d = 496$  в,  $I_0 = 0,21$ ,  $\tau_0 = 0,925$ ,  $\Delta\tau = 0,05$ ,  $3 \operatorname{tg}^2 15^\circ = 0,216$ ,  $x_a = 0,72$  ом,  $c = 31,6$ ,  $2I_d = 1 \cdot 65 \cdot 10^3$ ,  $\gamma_0^2 = 0,4$ .

$$\bar{x} = -(1 - 0,4) + \sqrt{(1 - 0,4)^2 - \frac{0,216}{0,21} 2(0,05^2 - 20,05 \cdot 0,925)} \approx 0,3,$$

$$Q_{\text{РПС}} = 0,72 \frac{1}{31,6^2} 0,3 \cdot 31,65^2 \cdot 10^6 \cdot 0,79^2 = 11 \text{ мвар},$$

$$Q_{\text{ПЕК}} = 0,4 \cdot 0,72 \frac{1}{31,6^2} 31,65^2 \cdot 10^6 \cdot 0,79^2 = 14 \text{ мвар}.$$

Регулировочные свойства ИРМ с параллельно включенным РПС.

При параллельном включении РПС и ПЕК (рис. 1 б) ИРМ представляет собой регулируемый контур  $LC$ , который существенно изменит режим работы КПП. Поэтому, прежде чем анализировать регулировочные свойства ИРМ, необходимо получить основные соотношения для КПП.

Точный анализ электромагнитных переходных процессов в 12-фазном эквивалентном, параллельном выпрямителе сопряжен с решением интегральных уравнений и определения постоянных интегрирования, что представляет собой сложную и громоздкую задачу. Вместе с тем, анализ формы кривой напряжения на контуре  $LC$ , при реальных параметрах этого контура и рабочих значениях тока нагрузки КПП показывает, что с достаточной для практики точностью падение напряжения на контуре  $LC$  может быть определено по первой гармонике первичного тока.

Эквивалентная схема продольно-компенсированной КПП с регулируемой степенью компенсации приведена на рис. 2. Амплитудное значение падения напряжения на конденсаторах УПК (в схема рис. 2) от тока основной гармоники найден как

$$|U_k| = 2,23 I_d \frac{x_c}{1 - \gamma_k^2}; \quad \gamma_k^2 = \frac{x_c}{x_p}.$$



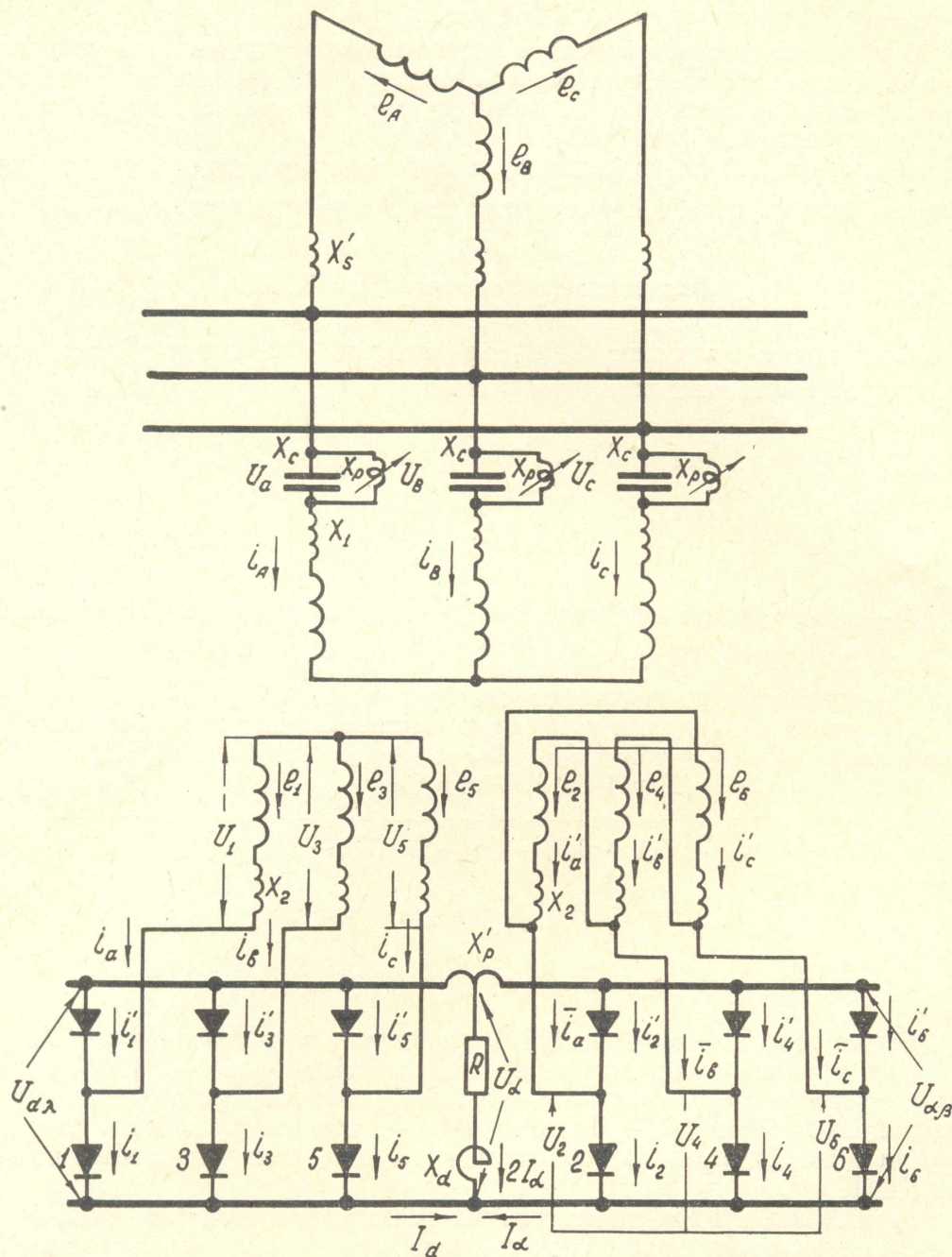


Рис. 2. Принципиальная схема продольно-компенсированной ПП с плавно регулируемой степенью компенсаций ПП. Показанные на рисунке реактивности приведены к вторичной звезде

Фаза напряжения  $U_K$  будет определяться фазовым углом комплексного сопротивления  $Z_K$  и фазовым углом тока  $I_1$ .

При задании фазных э. д. с. источника в виде

$$e_A = \sqrt{2} E_2 \sin V,$$

$$e_B = -\sqrt{2} E_2 \cos(V - 30^\circ), \quad e_C = \sqrt{2} E_2 \cos(V + 30^\circ)$$

с учетом обозначения фазового угла тока через  $\varphi_e$ , выражения для мгновенных значений тока  $i$ , запишем в виде



$$i_{1,A} = \sqrt{2} I_1 \sin(V - \varphi_e), \quad i_{1,B} = -\sqrt{2} I_1 \cos(V - 30^\circ - \varphi_e),$$

$$i_{1,C} = \sqrt{2} I_1 \cos(V + 30^\circ - \varphi_e).$$

При  $v_K^2 < 1$  сопротивление контура имеет емкостный характер и может быть выражено как

$$Z_k = \frac{x_c}{1 - v_K^2} e^{-i90^\circ}. \quad (6)$$

С учетом этого, мгновенное значение напряжения на контуре запишем в виде:

$$U_{K,A} = -2,23 I_d \frac{x_c}{1 - v_K^2} \cos(V - \varphi_e), \quad (7)$$

$$U_{K,B} = -2,23 I_d \frac{x_c}{1 - v_K^2} \sin(V - 30^\circ - \varphi_e), \quad (8)$$

$$U_{K,C} = -2,23 I_d \frac{x_c}{1 - v_K^2} \sin(V + 30^\circ - \varphi_e). \quad (9)$$

Подставим полученные выражения в уравнения (8), (10), (12), приведенные в [3], получим систему дифференциальных уравнений мостовой 12-фазной эквивалентной схемы выпрямления при включении в ее силовую цепь контура.

$$U_1 = \sqrt{2} E_2 \sin V - x_a \frac{d(i_1 - i'_1)}{dV} - \frac{x_3}{\sqrt{3}} \frac{d(i_2 - i'_2 - i_4 + i'_4)}{dV} + \\ + 2,23 I_d \frac{x_c}{1 - v_K^2} \cos(V - \varphi_e), \quad (10)$$

$$U_3 = -\sqrt{2} E_2 \cos(V - 30^\circ) - x_a \frac{d(i_3 - i'_3)}{dV} - \frac{x_3}{\sqrt{3}} \frac{d(i_4 - i'_4 - i_6 + i'_6)}{dV} + \\ + 2,23 I_d \frac{x_c}{1 - v_K^2} \sin(V - 30^\circ - \varphi_e), \quad (11)$$

$$U_5 = \sqrt{2} E_2 \cos(V + 30^\circ) - x_a \frac{d(i_5 - i'_5)}{dV} - \frac{x_3}{\sqrt{3}} \frac{d(i_6 - i'_6 - i_2 + i'_2)}{dV} - \\ - 2,23 I_d \frac{x_c}{1 - v_K^2} \sin(V + 30^\circ - \varphi_e), \quad (12)$$

где

$V$  — угловая текущая координата;

$i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, i_6$  — мгновенные значения токов в анодных группах вентилей,  $a$ ;

$i'_1, i'_2, i'_3, i'_4, i'_5, i'_6$  — мгновенные значения токов,  $a$ ; в катодных группах вентилей,

$U_1, U_2, U_3$  — мгновенные значения фазных напряжений, приложенных к порам вентилей «моста звезды» 1,1', 2,2'; 3,3' соответственно,  $b$ ;

$x_3$  — результирующий реактанс питающей системы,  $ом$ .

Для определения момента зажигания вентиля 1 при горении вентилей 5; 4; 6; 3 составим баланс напряжений в коммутирующем контуре (вентилей 1,5) и приравняем его к нулю.



$$U_1 - U_5 = \sqrt{6} E_2 \sin(V - 30^\circ) - x_a \frac{d(i_1 - i_5)}{dV} + \\ + 2,23 I_d \frac{x_c}{1 - v_k^2} \sqrt{3} \cos(V - 30^\circ - \varphi_e) = 0. \quad (13)$$

Поскольку в начальный момент коммутации  $i_1 = 0$ ;  $\frac{di_5}{dV} = 0$ , получим

$$\sqrt{6} E_2 \sin(V - 30^\circ) + 3,68 I_d \frac{x_c}{1 - v_k^2} \cos(V - 30^\circ - \varphi_e) = 0. \quad (14)$$

Записанное равенство тождественно выполняется при  $V = \Psi$  углу зажигания очередного вентиля, в данном случае вентиля 1.

Прежде чем найти из (14) значение  $\Psi$  на основании [2], заменим угол  $\varphi_e$  значением  $\varphi_e = \pm \alpha + f(\gamma)$ . С учетом этого угол  $-30^\circ \pm \alpha - f(\gamma) = -\Psi - f(\gamma)$ .

Здесь  $\alpha$  — угол саморегулирования, который представляет собой положительную или отрицательную разность между углом зажигания  $\Psi$  и углом  $30^\circ$ .

С учетом вышеизложенного выражение (14) примет вид

$$\sqrt{6} E_2 \sin(\psi - 30^\circ) + 3,86 I_d \frac{x_c}{1 - v_k^2} \cos[-f(\gamma)] = 0. \quad (15)$$

Решив (15) относительно  $\Psi$  с учетом соотношения  $f(\gamma) \simeq \frac{\gamma}{2}$  [2], после преобразований получим

$$\psi \simeq 30^\circ - \arcsin 2,23 \frac{J_0 v^2}{1 - v_k^2} \cos \frac{1}{2} \gamma. \quad (16)$$

Среднее значение выпрямленного тока КПП. При  $V > \Psi$ ;  $i_1 > 0$ ;  $\frac{di_5}{dV} \neq 0$ , кроме того,  $-\frac{di_1}{dV} = \frac{di_5}{dV}$ . С учетом этого после преобразований уравнение (15) примет вид

$$\frac{di_1}{dV} = \frac{\sqrt{6} E_2}{2x_a} \sin(V - 30^\circ) + 1,93 I_d \frac{v^2}{1 - v_k^2} \cos(V - 30^\circ - \varphi_e). \quad (17)$$

Проинтегрируем (17) в интервалах  $\Psi \leq V \leq \Psi + \gamma$ , после преобразований получим

$$I_d \simeq \frac{\sqrt{6} E_2 [\cos(\psi - 30^\circ) - \cos(\psi + \gamma - 30^\circ)]}{2x_a \left( 1 - 3,86 \frac{v^2}{1 - v_k^2} \sin \frac{\gamma}{2} \right)}$$

или в относительных единицах

$$J \simeq 0,866 \frac{\cos(\psi - 30^\circ) - \cos(\psi + \gamma - 30^\circ)}{1 - 3,86 \frac{v^2}{1 - v_k^2} \sin \frac{\gamma}{2}}, \quad (18)$$

для второго нагрузочного режима ( $\gamma = 30^\circ$ )

$$J \simeq 0,866 \frac{\cos(\psi - 30^\circ) - \cos\psi}{1 - \frac{v^2}{1 - v_k^2}}. \quad (18a)$$

Определение среднего значения выпрямленного напряжения в случае нерегулируемой ПК представлено в [2, 3]. Можно показать, что составляющая выпрямленного напряжения, обусловленная наличием



контура  $LC$  в первом и втором нагрузочных режимах ( $0 \leq \gamma \leq 30^\circ$ ), за период повторяемости равна нулю. С учетом этого и [2, 3]

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_2 [\cos(\psi - 30^\circ) + \cos(\psi + \gamma - 30^\circ)]. \quad (19)$$

На основании (18) и (19) вольтамперная характеристика КПП для первого и второго нагрузочных режимов имеет вид

$$\frac{J^2}{3\sin^2 \frac{\gamma}{2}} + \frac{\tau^2}{\cos^2 \frac{\gamma}{2}} = 1, \quad (20)$$

где

$$J' \simeq J_0 \left( 1 - \frac{v^2}{1 - v_k^2} \right), \text{ при } \gamma = 30^\circ,$$

$$J' \simeq J_0 \left( 1 - 3,86 \frac{v^2}{1 - v_k^2} \sin \frac{\gamma}{2} \right), \text{ при } \gamma < 30^\circ. \quad (21)$$

Изменяя величину  $v_k^2$  путем плавного изменения сопротивления РПС мы уменьшаем  $J'$  и в соответствии с (20) увеличиваем  $\tau$ , тем самым как бы повышаем степень ПЕК. Таким образом, регулирование ИРМ с параллельным включением РПС без перехода резонансной точки возможно только вверх и всегда с присутствием компенсирующего эффекта.

Искомая регулировочная характеристика на основании (20) и (21) после преобразований имеет вид

$$x = \frac{v^2 - v_k^2 \sqrt{(1 - v_k^2)^2 - \frac{A}{B}}}{2v^2 - v_k^4 + \frac{A}{B}}, \quad (22)$$

где

$$A = 3\sin^2 \frac{\gamma}{2} (2\tau_0 \Delta\tau + \Delta\tau^2);$$

$$B = J_0^2 \cos^2 \frac{\gamma}{2};$$

$$x = 1 - v_k^2.$$

Проверкой правильности (22) свидетельствует равенство  $\bar{x} = 1$  при  $A = 0$ , т. е.  $\Delta\tau = 0$ . С учетом обозначений, зная величину  $\bar{x}$ , получим:

$$v_k^2 = 1 - \bar{x}, \quad (23)$$

$$x_p = \frac{v^2 x_a}{v_k^2}, \quad (24)$$

$$Z_k = \frac{x_a v^2}{1 - v_k^2}, \quad (25)$$

$$U_k = 1,58 I_d \frac{Z_k}{c}, \quad (26)$$

где

$U_k$  — действующее значение падения напряжения на контуре.  
Требуемая мощность элементов контура равна

$$Q_{\text{ПЕК}} = 3 \frac{U_k^2}{x_a v_0^2}, \quad (27)$$

$$Q_{\text{РПС}} = Q_{\text{ПЕК}} v_k^2. \quad (28)$$

Пример. Рассчитаем требуемую мощность ветвей ИРМ при условии, что

$$v_0 = 0,1, x = 0,72 \text{ ом}, 2 I_d = 165 \text{ ка}, c = 31,6;$$



$$I_0 = 0,21, \tau_0 = 0,875, +\Delta\tau = 5 \cdot 10^{-2} \text{ при } \gamma = 30^\circ;$$

$$A = 0,0181, B = 0,41, \quad \frac{A}{B} = 0,44;$$

$$\bar{x} = \frac{0,1 \pm 0,1 \sqrt{0,9^2 - 0,44}}{0,12 - 0,01 + 0,44} = 0,25;$$

$$\gamma_k = 0,75, \quad x_p = 0,096, \quad U_k = 1150 \text{ в};$$

$$Q_{\text{ПЕК}} = \frac{3 \cdot 1150^2}{0,1 \cdot 0,72} = 55 \text{ мвар}, \quad Q_{\text{РПС}} = 55 \cdot 0,75 = 41 \text{ мвар}.$$

### Сопоставление рассмотренных схем ИРМ оперативного регулирования тока нагрузки КПП

Все сопоставляемые схемы рассчитаны на диапазон регулирования  $\pm 2,5\% U_d$ , что составляет 24 в.

1. Последовательное включение РПС.

$$Q_{\text{ПЕК}} = 14 \text{ мвар}, \quad Q_{\text{РПС}} = 11 \text{ мвар}.$$

2. Параллельное включение РПС.

$$Q_{\text{ПЕК}} = 55 \text{ мвар}, \quad Q_{\text{РПС}} = 41 \text{ мвар}.$$

Из сопоставления следует, что первый вариант плавного регулирования тока нагрузки КПП потребует меньших капитальных затрат, и при этом следует ожидать меньших активных потерь электроэнергии, так как эти потери пропорциональны требуемой для регулирования реактивной мощности элементов.

### Выводы

Из приведенного исследования следует, что

1. Статические регулируемые ИРМ могут рассматриваться как средство оперативного регулирования тока серии;

2. Рассмотренные ИРМ имеют компенсирующий эффект во всем диапазоне регулирования и, следовательно, будут способствовать снижению электропотребления реактивной мощности КПП или повышению ее производительности;

3. Последовательное включение РПС и ПЕК обладает лучшими удельными регулировочными свойствами и требуют меньшей мощности РПС и ИРМ.

Кроме того, в процессе исследования получены основные соотношения, позволяющие рассчитать режим работы КПП при включении в ее токовую цепь контура.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Веников и Л. А. Жданов. Регулирование режима электрических систем и дальних электропередач и повышение их устойчивости при помощи управляемых статических ИРМ. «Электричество», 1967, № 6.
2. С. Р. Глинттерник. Электромагнитные процессы и режимы мощных статических преобразователей. «Наука», М., 1968.
3. Р. И. Остапенко. Продольная компенсация преобразовательной подстанции алюминиевого завода. Сборник трудов 11-й краевой экономической конференции, Красноярск, 1970.
4. Ш. М. Размадзе. Преобразовательные схемы и системы. Изд-во «Высшая школа», Москва, 1967.